

主动移相法在光伏逆变器孤岛检测中的应用

本文介绍了被动式和主动式孤岛效应检测方法的基本原理，分析比较后选择一种被动式和主动式孤岛检测方法，在一台额定输出功率为5 kW的光伏逆变器上实现该算法，实验结果表明，所选用的孤岛检测方法能可靠、快速地对孤岛效应做出反应，逆变器输出电流的谐波满足并网要求。

张宝群 马龙飞 宫成 杨冰 迟忠君 焦然 刘慧珍 宋小松/国网北京市电力公司

0 引言



张宝群/工程师

关键词/Keywords

光伏逆变器 ·
孤岛检测 ·
主动移相 ·

太阳能作为一种清洁、丰富和可再生的新能源，它的开发利用对缓解能源危机、保护生态环境和保证经济的可持续发展意义重大。从长远看，太阳能光伏发电在不远的将来会占据世界能源消费的重要席位，不但要替代部分常规能源，而且将成为世界能源供应的主体。对于并入电网中的逆变器，要求其电网频率偏移正常范围时做出快速的反应。此外，对于有光伏逆变器构成的微网，相关规程要求逆变器至少提供一种主动式和被动式孤岛效应检测方法，而主动式孤岛检测方法通过有意地引入扰动信号来监控系统中电压、频率以及阻

抗的相应变化，以确定电网存在与否。因此，选择一种简单、快速、可靠的孤岛效应检测方法对光伏逆变器来说具有重要的意义。

1 孤岛效应

孤岛效应是指当电网由于各种原因中断供电后，太阳能光伏发电系统未能从电网断开而与负载构成一个电网无法控制的自给供电孤岛^[1-3]。光伏发电系统处于孤岛运行时会导致孤岛区域供电电压、频率的不稳定，影响配电系统的保护动作，电网恢复供电时的冲击电流可能会损坏逆变器，威胁电网检修人员的安全等^[4]。因此，并网发电的光伏系统必须设有防孤岛保护功能。

2 孤岛检测方法

IEEE Std. 929—2000规定了相应的防孤岛检测标准，该标准给出了并网逆变器从电网断开后到检测到孤岛现象并与电网断开的时限。孤岛检测方法分为被动式孤岛检测和主动式孤岛检测。

2.1 被动式孤岛检测

被动式孤岛检测方法根据公共耦合点电压、频率、相位跳变和谐波来判断是否产生了孤岛效应。孤岛效应等效电路如图1所示。

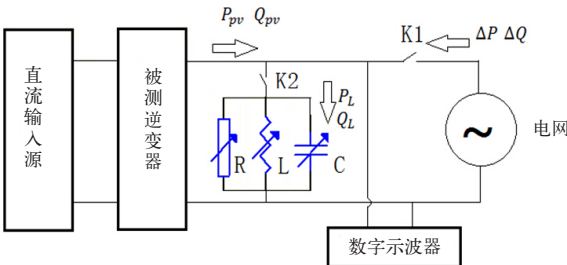


图1 孤岛效应等效电路

电网正常工作时

$$P_L = P_{pv} - \Delta P = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

$$Q_L = Q_{pv} - \Delta Q = U^2 \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \quad (2)$$

其中, U 、 ω 为负载的电压和频率, P_{pv} 、 Q_{pv} 为逆变器输出的有功和无功, P_L 、 Q_L 为负载消耗的有功和无功。孤岛效应发生后

$$P'_L = P_{pv} = \frac{U^2}{R} \quad (3)$$

$$Q'_L = U'^2 \left(\frac{1}{\omega' L} - \omega' C \right) \quad (4)$$

当 $\Delta P=0$ 时, 输出电压的幅值不变。当 $\Delta Q=0$ 时, 输出电压的频率不变。因此, 通过检测公共节点处的电压或频率跳变来判断孤岛效应存在盲区。

相位突变检测的原理是, 光伏系统并网运行时, 输出电流与公共节点的电压同频同相。当发生孤岛效应后公共节点处的电压由输出电流和负载阻抗决定, 由于锁相环的作用, 使得输出电流和电压在过零点同步, 而在过零点外, 电压和电流产生相位差, 导致相位突变, 通过检测该相位突变以判断孤岛效应。但如果负载为阻性时, 由于阈值的限制, 相位突变法对孤岛效应检测失效^[5]。

电压谐波检测法的原理是光伏系统正常并网运行时网络阻抗小, 而电网断开时负载阻抗比电网网络阻抗大很多, 在公共节点处产生较大的谐波, 公共节点处电压的谐波含量突增时可以判断为发生了孤岛效应。但实际应用时电网的谐波比较大, 电压谐波突变量的阈值很难确定, 因此, 电压谐波检测法有较大的局限性。

由以上分析可知, 通过检测公共耦合点电压、频率、相位和谐波的突变量来判断孤岛效应存在着盲区, 并网的光伏逆变器应至少设置一种主动和被动式防孤岛效应保护^[6]。

2.2 主动式孤岛检测

并网逆变器一般采用直接控制输出电流的控制模式^[7]。由逆变器输出电流表达式

$$i_{ac} = i_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

可知, 主动式检测方法可以施加的扰动量有输出电流的幅值、频率和相位。典型的基于幅值的扰动的算法有电压正反馈法 (Sandia Voltage Shift, SVS)、基于频率扰动的主动频率偏移法 (Active Frequency Drift, AFD) 和基于相位扰动的自动移相法 (Auto Phase Shift, APS)。

电压正反馈法对逆变器的输出电流引入正反馈, 输出电流由公共节点处的电压的波动给定, 电压越高, 输出电流越大。在电网正常的情况下, 公共节点处的电压被嵌制在正常范围内, 在电网断开后, 公共节点处的电压波动被人为放大, 偏离正常范围以检测孤岛效应。

主动频率偏移法以公共节点处的频率偏移作为逆变器的输出电流频率, 使输出电流的频率略高于输出电压的频率, 当逆变器 and 电网连接时, 由于受到电网的嵌制作用, 输出电流的频率在满足并网的要求。当孤岛效应产生时, 该频率扰动量会迅速积累, 致使逆变器输出电流的频率超出正常范围, 频率保护启动断开逆变器与电网的连接。

主动移相法在输出基波电流和电压之间产生一个角度差, 在发生孤岛效应后该角度差驱动系统频率向上或向下偏离正常值, 频率保护将逆变器从电网断开。

2.3 主动移相孤岛检测

主动移相法只需在输出电流的每一拍给一定的相位扰动, 再检测公共节点的频率, 算法简单, 降低了编程难度, 因此, 在本实验中采用主动移相法进行孤岛效应检测。主动移相模型有滑动移相法 (Slip Mode phase Shift, SMS) 和自动移相法。滑动移相法将偏移的相位设置为偏离电网频率的正弦函数

$$\theta_{sms} = \frac{2\pi}{360} \theta_m \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g} \right) \quad (6)$$

其中, f_g 为电网的额定频率, θ_m 为最大相移角, f_m 为产生该相角时的频率。SMS方法存在稳定的运行点而不能触发频率保护, 存在检测盲区^[8]。本文在SMS方法的基础上进行了改进: ①设置初始相位, 使得孤岛效应发生瞬间就能可靠触发频率偏

移；②以公共节点处的频率偏移作为移相的扰动量，频率偏移越大，移相角越大，加快了孤岛效应检测速度；③固定时间间隔内改变移相扰动方向。

APS的相角由下式给出

θ_{APS} = k · $\frac{2\pi}{360}$ + Δf · sign(Δf) (7)

其中，k为移相因子，Δf为当拍公共节点处的频率偏移量，sign(Δf)的值为1或-1，每隔0.5 s会改变一次正负号。孤岛效应发生时如果逆变器所带的负载和其输出功率相匹配，负载的谐振频率有可能接近工频，而单一方向的移相扰动恰好使得公共节点处的频率刚好为工频，此时存在检测盲区，所以在固定时间间隔内改变移相方向可以消除这个检测盲区。

以θ_{APS}对输出电流的相位进行扰动

θ_{out} = θ_{grid} + θ_{APS} (8)

其中，θ_{grid}是当拍检测到的公共节点处的电压的相位角，θ_{out}为当拍要输出的电流的相位角。

3 算法验证

本实验中的逆变器额定输出功率为5 kW，控制芯片采用TI的TMS320F28335，该芯片具有150 MHz的主频，逆变桥的mosfet开关频率为20 kHz，控制芯片在50 μs内要完成采样、软件锁相、测频和逆变控制等算法。孤岛检测平台如图1所示。K1为被测逆变器的网侧分开关，K2为被测逆变器的负载分开关。负载采用可变RLC谐振电路，谐振频率为被测逆变器的额定频率，其消耗的有功与被测逆变器输出的有功功率相当。试验步骤如下。

(1) 闭合K1，断开K2，启动逆变器。通过调节直流输入源，使逆变器的输出功率P_{EUT}等于额定交流输出功率，并测量逆变器输出的无功功率Q_{EUT}。

(2) 使逆变器停机，断开K1。

(3) 通过以下步骤调节RLC电路使得Q_f=1.0±0.05。

①RLC电路消耗的感性无功满足关系式Q_L=Q_f*P_{EUT}=1.0*P_{EUT}

②接入电感L，使其消耗的无功等于Q_L。

③并入电容C，使其消耗的容性无功满足关系式Q_C+Q_L=-Q_{EUT}。

④并入电阻R，使其消耗的有功等于P_{EUT}。

(4) 闭合K2接入RLC电路，闭合K1，启动逆变器，确认其输出功率符合步骤(1)的规定，调节R、L、C，直到流过K1的基频电流小于稳态时逆变器额定输出电流的1%。

(5) 断开K1，记录K1断开至逆变器输出电流下降并维持在额定输出电流的1%以下的时间。

(6) 调节有功负载(电阻R)和任一无功负载(L或C)以获得表1中负载不匹配状况，符号表示图1中流经开关K1的有功功率流和无功功率流的方向，正号表示功率流从逆变器到电网。每次实验的数据记录如表1所示。

表1 防孤岛效应保护动作时间

负载匹配偏差(%)	跳闸时间/ms
(0,0)	160
(-5,-5)	96
(-5,0)	76
(-5,5)	104
(0,-5)	70
(0,5)	115
(5,-5)	75
(5,0)	75
(5,5)	104

实验中设置当频率低于48 Hz或50.5 Hz时频率保护跳闸，判定为发生了孤岛效应。从表1可以看出，主动移相法能快速、准确地对孤岛效应进行检测，当负载与逆变器输出功率相匹配时，防孤岛效应保护的动作时间为160 ms，远远小于2 s的并网要求。

不同的输入功率下，逆变器输出交流侧的功率因数如表2所示。

表2 不同输入功率下输出交流侧的功率因数

输入功率/W	功率因数
1 000	0.964 2
2 000	0.991 4
3 000	0.996 0
4 000	0.997 2
5 000	0.997 9

以额定输出功率运行时，输出电流的各次谐波如图2所示。

从表2和图2的结果来看，加入主动移相算法对孤岛效应进行检测后，逆变器交流输出的电能

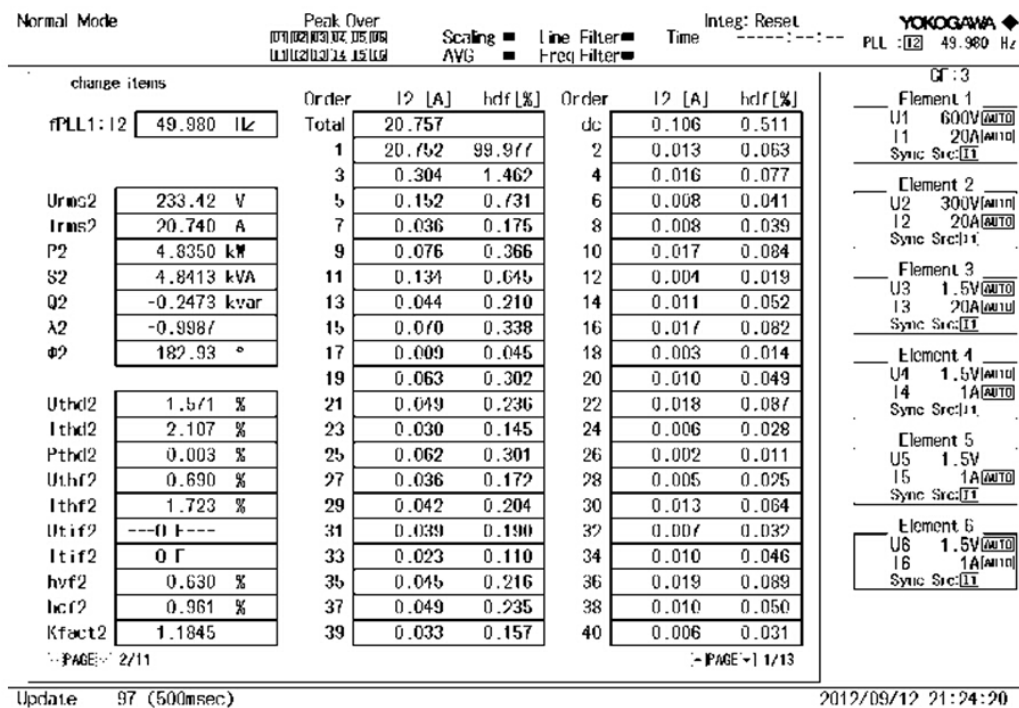


图2 额定输出功率下的各次谐波

质量符合文献[6]规定的并网技术要求。

4 结束语

自动移相法原理简单，易于编程实现。以前一个周波的频率偏移量来对逆变器输出电流的相位进行扰动，能加快频率偏移速度，在一定时间间隔内改变相角扰动的方向能消除检测盲区，快速、准确地检测到孤岛效应。实验结果表明，选用自动移相法进行防孤岛效应后逆变器输出电流的各次谐波和功率因数均满足相关规程的要求。

参考文献

[1] Minzuno T, Noda Y, Koizumi H, et al. The experimental results of an islanding detection method for Japanese AC modules[C]//3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003. 2058-2061.

[2] IEEE std 929-2000 IEEE recommended practice for utility interface of Photovoltaic(PV) Systems[S].

[3] 禹华军, 潘俊民. 并网发电逆变系统孤岛检测新方法的研究[J]. 电力系统及其自动化

报, 2005, 17(5), P55-59.

[4] 冯轲, 贺明智, 游小杰, 等. 光伏并网发电系统孤岛检测技术研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(2), P39-42.

[5] Ropp M E. Design issues for grid-connected photovoltaic systems[D], PhD Dissertation, Georgia Inst Technology, Atlanta, GA, 1998.

[6] 北京鉴衡认证中心. 并网光伏发电专用逆变器技术条件发布稿, 2011.

[7] 刘芙蓉. 并网型户用光伏系统的孤岛检测技术研究[D]. 华中科技大学博士学位论文, 2008.

[8] 薛明. 光伏并网发电系统之孤岛检测技术研究[D]. 华中科技大学博士学位论文, 2008.

作者简介

张宝群 (1982-), 男, 博士, 工程师, 主要从事新能源与电能质量研究。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**

(编辑: 张万英)